Das Wesen des Lichts

Max Planck

OTTO HARRASSOWITZ
LIBRARY AGENT
LEIPZIG
Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

DAS WESEN DES LICHTS

VORTRAG

GEHALTEN IN DER HAUPTVERSAMMLUNG
DER KAISER-WILHELM-GESELLSCHAFT
AM 28. OKTOBER 1919

UNIV. OF CALIFORNIA

VON

DR. MAX PLANCK
PROFESSOR DER THEORETISCHEN PHYSIK
AN DER UNIVERSITÄT BERLIN

ZWEITE, UNVERÄNDERTE AUFLAGE

II 5ii

BERLIN
VERLAG VON JULIUS SPRINGER
1920

Digitized by Google

QC361
P6

Alle Rechte vorbehalten.
Copyright 1920 bei Julius Springer in Berlin.

Digitized by Google

Meine hochverehrten Herren!

Es mag ein wenig aussichtsreiches, ja in gewissem Sinne vermessenes Unterfangen scheinen, wenn ich in diesem weiteren Kreise, mitten in einer von aufregenden Krisen erschütterten Zeit, während die vornehmsten Interessen und die besten Kräfte unseres ganzen Volkes nur auf den bitteren Kampf um seine Existenz und seine Weltgeltung eingestellt sind, den Versuch wage, Ihre Aufmerksamkeit auf kurze Frist für ein Thema rein wissenschaftlicher Art in Anspruch zu nehmen. Aber eingedenk des gerade heute in mehrfacher Beziehung bedeutungsvollen Satzes, daß ein Gemeinwesen nur dann gedeihen kann, wenn auch an dem unscheinbarsten Posten ein jeder, unbeirrt durch äußere Verlockungen und Hemmnisse, nach bestem Können seiner Pflicht nachgeht, ohne erst viel nach dem augenblicklichen Erfolg seiner Arbeit zu fragen, habe ich die entgegenstehenden Bedenken überwunden und möchte nunmehr, dem mir gewordenen ehrenvollen Auftrage folgend, mir erlauben, Sie zu einem gemeinsamen Gang in die lichten, wenn auch für die meisten von Ihnen wohl etwas entlegenen Höhen der reinen Forschung, und zwar der physikalischen Forschung, einzuladen. Empfiehlt sich die Wahl eines solchen Themas allgemein wissenschaftlicher Art schon durch den äußeren Umstand, daß in den praktisch so viel wichtigeren Gebieten der Technik und der Industrie die interessantesten neueren Probleme sich gegenwärtig aus mancherlei Gründen einer eingehenden Be-

471441

Digitized by Google

sprechung hier zur Zeit noch entziehen, so wird es andererseits gerade im Sinne der Bestrebungen unserer Gesellschaft liegen, welche ja ihre vornehmste Aufgabe in der Gründung und Erhaltung naturwissenschaftlicher Forschungsinstitute erblickt, wenn in ihren Tagungen die alte Wahrheit auch äußerlich Würdigung findet, daß, wie auf allen Arbeitsgebieten, so auch in demjenigen, welches den Naturkräften gewidmet ist, dem Anwenden das Erkennen vorausgehen muß, und je feiner die Einzelheiten sind, in die wir der Natur auf irgendeinem Pfade folgen können, um so reicher und nachhaltiger wird sich auch der Gewinn erweisen, den wir aus unserer Erkenntnis zu ziehen vermögen.

In dieser Hinsicht ist unter allen Gebieten der Physik ohne Zweifel die Optik dasjenige, in welchem die Forschungsarbeit am tiefsten vorgedrungen ist, und so möchte ich jetzt von dem Wesen des Lichts zu Ihnen reden, anknüpfend an vieles, was ohne Zweifel einem jeden von Ihnen seit langem geläufig ist, aber auch Ausschau haltend auf neuere Probleme, welche auf diesem Gebiete gegenwärtig der Erledigung harren.

Die erste Aufgabe der physikalischen Optik, die Vorbedingung für die Möglichkeit einer rein physikalischen Theorie des Lichtes, ist die Zerlegung des ganzen Komplexes von Vorgängen, die mit einer Lichtwahrnehmung verbunden sind, in einen objektiven und einen subjektiven Teil. Der erstere bezieht sich auf diejenigen Vorgänge, welche außerhalb und unabhängig von dem empfindenden Organ, dem sehenden Auge, verlaufen — diese, die sogenannten Lichtstrahlen, sind es, welche die Domäne der physikalischen Forschung bilden—, der zweite Teil umfaßt die inneren Vorgänge, vom Auge bis zum Gehirn, deren Untersuchung auch in die Physiologie und sogar in die Psychologie hineinführt. Daß eine scharfe Trennung des objektiven Lichtstrahls von der sinn-

Digitized by Google

lichen Lichtempfindung überhaupt vollständig durchgeführt werden kann, ist keineswegs von vornherein selbstverständlich, und daß sie im Grunde genommen eine sehr schwierige Gedankenoperation bedingt, beweist nichts besser als der Umstand, daß noch vor hundert Jahren ein gerade auch naturwissenschaftlich so reich veranlagter, aber der analysierenden Betrachtungsweise weniger geneigter Geist, wie es Johann Wolfgang von Goethe war, der das Einzelne nie ohne das Ganze sehen wollte, es zeitlebens grundsätzlich abgelehnt hat, jene Scheidung anzuerkennen. Und in der Tat: Welche Behauptung könnte für den Unbefangenen einleuchtendere Gewißheit besitzen als die, daß Licht ohne ein empfindendes Auge undenkbar, ein Nonsens ist? Aber was in diesem letzten Satze unter Licht zu verstehen ist, um ihm einen unanfechtbaren Inhalt zu geben, ist etwas ganz anderes als der Lichtstrahl des Physikers. Wenn auch der Name der Einfachheit halber beibehalten worden ist, so hat doch die physikalische Lehre vom Licht oder die Optik, in ihrer vollen Allgemeinheit genommen, mit dem menschlichen Auge und mit der Lichtempfindung so wenig zu tun, wie etwa die Lehre von den Pendelschwingungen mit der Tonempfindung, und eben dieser Verzicht auf die Sinnesempfindung, diese Beschränkung auf die objektiven, realen Vorgänge, welche an sich ohne Zweifel ein bedeutendes, der reinen Erkenntnis zuliebe gebrachtes Opfer vom Standpunkt des unmittelbaren menschlichen Interesses bedeutet, hat einer über alles Erwarten großartigen Erweiterung der Theorie den Weg geebnet und gerade auch für die praktischen Bedürfnisse der Menschheit reiche Früchte ungeahnter Art gezeitigt.

Für die Frage nach dem physikalischen Wesen eines Lichtstrahls war von entscheidender Bedeutung die Entdeckung, daß das Licht, sowohl dasjenige, welches von den Gestirnen kommt, als auch das aus irdischen Lichtquellen stammende,

Digitized by Google

eine gewisse meßbare Zeit braucht, um sich von dem Orte seiner Entstehung bis zu dem Orte der Wahrnehmung fortzupflanzen. Was ist nun aber dieses Etwas, das sich in dem leeren Weltenraum oder in der atmosphärischen Luft mit der ungeheuren Geschwindigkeit von 300 000 km in der Sekunde nach allen Seiten ausbreitet? Der Begründer der klassischen Mechanik, Isaac Newton, machte die einfachste und naheliegendste Annahme, daß es gewisse winzig kleine substanzielle Partikelchen sind, welche von der Lichtquelle, etwa einem glühenden Körper, mit jener Geschwindigkeit nach allen Richtungen auseinanderfliegen, verschiedenartig für jede Farbe, und es ist uns heute immer noch ein besonders auffallender Beweis dafür, daß auch in der exaktesten aller Naturwissenschaften eine überragende Autorität unter Umständen einen hemmenden Einfluß auf die Entwicklung der Wissenschaft ausüben kann, wenn wir bedenken, daß diese Newtonsche Emanationstheorie ein volles Jahrhundert lang entschieden die Herrschaft behaupten konnte, trotzdem ihr ein anderer hochbedeutender Forscher, Christian Huygens, von Anfang an seine viel leistungsfähigere Undulationstheorie gegenübergestellt hatte. Huygens stellte die Geschwindigkeit des Lichtes nicht, wie Newton, in Parallele mit der Geschwindigkeit des Windes, sondern mit der Geschwindigkeit des Schalles, bei welchem die Fortpflanzungsgeschwindigkeit ja etwas ganz anderes bedeutet als die Geschwindigkeit der Luftbewegung. Was sich in der Luft von einem tönenden Instrument aus oder auf einer Wasserfläche von einem hineingeworfenen Stein aus nach allen Richtungen mit gleichmäßiger Geschwindigkeit ausbreitet, sind nicht die Luft- oder Wasserteilchen selber, sondern vielmehr die Verdichtungen und Verdünnungen oder die Wellenberge und -täler, also nicht die Materie selber, sondern ein bestimmter Zustand der Materie. Daher legte Huygens seiner Theorie

Digitized by Google

eine den ganzen unendlichen Raum stetig erfüllende feine Materie, den Lichtäther, zugrunde, dessen Wellen im Auge ebenso die Lichtempfindungen erregen, wie die Luftwellen im Ohre die Tonempfindungen; und wie für das Gehör die Tonhöhe, so wird für das Gesicht die Farbe durch die Längen der Wellen oder, was auf dasselbe hinauskommt, durch die Zahl der Schwingungen pro Sekunde charakterisiert. Was der Huygensschen Theorie nach hartem Kampf schließlich das entschiedene Übergewicht über die Newtonsche verlieh, war schließlich neben mehreren anderen Umständen die Tatsache, daß, wenn zwei Lichtstrahlen gleicher Farbe auf gleicher Bahn zusammentreffen, sich ihre Intensitäten keineswegs immer einfach addieren, sondern unter gewissen Bedingungen sich gegenseitig schwächen, ja sogar vollständig auslöschen. Diese Erscheinung, die Interferenz, wird nach der Huygensschen Auffassung ohne weiteres dadurch verständlich, daß immer ein Wellenberg des einen Strahles mit einem Wellental des anderen Strahles zusammentrifft, während die Newtonsche Emanationstheorie an diesem Punkt naturgemäß versagt, da es durchaus nicht einzusehen ist, wie zwei gleichartige, in gleicher Richtung mit der nämlichen Geschwindigkeit fliegende Substanzteilchen sich gegenseitig neutralisieren können.

Ein weiterer grundsätzlich bedeutsamer Einblick in das Wesen des Lichtes ward gewonnen durch die Erkenntnis der Identität der leuchtenden und der wärmenden Strahlen; er bildet den ersten Schritt auf dem oben angedeuteten Wege der vollständigen Abstraktion von den menschlichen Sinnesempfindungen. Daß die kalten Lichtstrahlen des Mondes, physikalisch genommen, von genau der nämlichen Art sind wie die dunklen Wärmestrahlen eines geheizten Kachelofens, nur durch die viel kürzere Wellenlänge von ihnen verschieden, ist eine Behauptung, von der man sich nicht wundern darf,

Digitized by Google

daß sie anfangs vielfach Bedenken erregte, und bezeichnenderweise hat gerade derjenige Physiker, welcher an dem Beweise ihrer Richtigkeit den hervorragendsten Anteil nahm, Melloni, seine Versuche ursprünglich in der Absicht begonnen, ihre Unhaltbarkeit nachzuweisen. Es ist nämlich dabei im Auge zu behalten, daß, wie bei allen induktiven Schlußfolgerungen so auch hier, ein logisch zwingender Beweis überhaupt nicht geführt werden kann; was sich zeigen läßt, ist nur, daß alle Gesetze, welche für die leuchtenden Strahlen gelten, namentlich die der Reflexion, Brechung, Interferenz, Polarisation, Dispersion, Emission, Absorption, auch für die wärmenden Strahlen zutreffen. Aber wer sich trotzdem weigern wollte, die Identität beider Arten von Strahlen anzuerkennen, würde deshalb doch nie eines logischen Widerspruches überführt werden können; denn er könnte sich immer darauf berufen, daß möglicherweise künftig doch noch einmal ein durchgreifender Unterschied zutage kommen könnte. Die praktische Unhaltbarkeit seines Standpunktes besteht nur darin, daß er folgerichtig gezwungen ist, auf eine Reihe von wichtigen Schlußfolgerungen zu verzichten, welche die Identitätstheorie ohne weiteres mit sich bringt. Er dürfte z. B. nicht die Behauptung aufstellen, daß die Mondstrahlen auch wärmen, während diese Tatsache gegenwärtig für jeden vernünftigen Physiker, auch wenn sie nicht durch besondere Versuche bestätigt worden wäre, außer Zweifel stehen würde.

Der so geschlossenen Union zwischen den leuchtenden und den wärmenden, ultraroten Strahlen gliederten sich ohne weitere Schwierigkeit auf der anderen Seite des Spektrums die chemisch wirksamen, ultravioletten Strahlen an. Daß aber diese Gemeinschaft verschiedener Strahlenarten noch einer ungeheuren Erweiterung, und zwar nach beiden Seiten des Spektrums hin, fähig ist, sollte erst viel später an

Digitized by Google

den Tag kommen. Um einen solchen großartigen Fortschritt zu erzielen, bedurfte es freilich noch einer besonderen Vorarbeit, nämlich des Überganges von der mechanischen zur elektromagnetischen Lichttheorie.

Nicht nur Newton und Huygens, sondern auch ihre unmittelbaren Nachfolger waren sich bei aller sonstigen Verschiedenheit ihrer Anschauungen doch darüber einig, daß das Verständnis für das Wesen des Lichts auf dem Boden der mechanischen Naturauffassung gesucht werden müsse, und diese Forschungsrichtung erhielt auch späterhin durch den mit der Entdeckung des Prinzips der Erhaltung der Energie verbundenen glänzenden Aufschwung der mechanischen Wärmetheorie von neuem einen mächtigen Antrieb. Daß die Ätherschwingungen nicht, wie die Luftschwingungen in einer Flöte, longitudinal, in der Richtung der Fortpflanzung, sondern, wie die Schwingungen einer Violinsaite, transversal, senkrecht zur Richtung der Fortpflanzung, erfolgen, war bald durch den Nachweis der Polarisation festgestellt. Aber es wollte durchaus nicht gelingen, von den Gesetzen der allgemeinen Mechanik und der Elastizitätslehre aus, dem Wesen dieser Bewegungen noch näher zu kommen, und je üppiger die Hypothesen auf dem Boden der mechanischen Theorie des Lichtes emporschossen, sei es durch die Annahme eines stetig ausgedehnten oder durch die eines atomistisch konstituierten Äthers, um so deutlicher zeigte sich die Unzulänglichkeit jeder einzelnen derselben. Da trat um die Mitte des vorigen Jahrhunderts James Clerk Maxwell mit der kühnen Hypothese auf, daß das Licht ein elektromagnetischer Vorgang ist. Er war durch seine Theorie der Elektrizität zu dem Schluß geführt worden, daß eine jede elektrische Störung sich von dem Ort ihrer Entstehung aus im leeren Raume wellenförmig mit einer Geschwindigkeit von 300 000 km in der Sekunde fortpflanzt, und das Zusammentreffen dieser

Digitized by Google

aus rein elektrischen Messungen abgeleiteten Zahl mit der Größe der Lichtgeschwindigkeit gab ihm den ersten Anstoß zu dem Versuch, das Licht geradezu als eine elektromagnetische Störung aufzufassen. Der Beweis für die Haltbarkeit dieses Standpunktes läßt sich auch hier nur dadurch führen, daß alle daraus entspringenden Folgerungen durch die Erfahrung bestätigt werden. Der mit seiner Gewinnung verbundene grundsätzliche Fortschritt lag in einer ungeheuren Vereinfachung der Theorie und in der Fülle der Folgerungen, die sich unmittelbar daraus ziehen lassen.

Freilich ist das Wesen der elektromagnetischen Vorgänge uns um keine Spur verständlicher wie das der optischen. Wer aber der elektromagnetischen Theorie des Lichtes als einen Nachteil anrechnen wollte, daß sie an die Stelle eines Rätsels ein anderes setzt, der verkennt die Bedeutung dieser Theorie. Denn ihre Leistung besteht eben darin, daß sie zwei Gebiete der Physik, die bis dahin getrennt voneinander behandelt werden mußten, zu einem einzigen vereinigt hat, daß also alle Sätze, welche für das eine Gebiet gelten, ohne weiteres auch auf das andere anwendbar sind — ein Erfolg, der der mechanischen Lichttheorie eben nicht gelungen ist und nicht gelingen konnte. Vor der Einführung der elektromagnetischen Lichttheorie zerfiel die Physik in drei getrennte Teile: die Mechanik, die Optik, die Elektrodynamik, und ihre Vereinigung bildete die letzte und größte Aufgabe aller physikalischen Forschung. Da nun die Optik sich durchaus nicht in die Mechanik einfügen wollte, ist sie nun statt dessen wenigstens mit der Elektrodynamik restlos verschmolzen und dadurch die Zahl der getrennten Gebiete auf zwei herabgemindert worden — der vorletzte Schritt auf dem Wege zur Einheit des physikalischen Weltbildes. Wann und wie der letzte Schritt: die Verschmelzung der Mechanik mit der Elektrodynamik, erfolgen wird, steht auch heute noch dahin,

Digitized by Google

obwohl gerade gegenwärtig manche geistvolle Forscher bei dieser Aufgabe am Werke sind; einstweilen scheint sie noch nicht vollständig reif zur Lösung zu sein. Jedenfalls ist die ursprüngliche mechanische Naturauffassung, welche die Elektrodynamik einfach in die Mechanik aufgehen lassen will, dadurch, daß sie den Äther oder, falls der nicht mehr ausreicht, einen Ersatzstoff dafür als den Träger aller elektrischen Erscheinungen ansieht, gegenwärtig bei der Mehrzahl der Physiker stark in den Hintergrund getreten. Was ihr wohl am meisten Abbruch getan hat, ist die aus der Einsteinschen Relativitätstheorie fließende Folgerung, daß es einen objektiven, d. h. vom messenden Beobachter unabhängigen substantiellen Äther gar nicht geben kann. Denn sonst würde von zwei sich im Raume gegeneinander bewegenden Beobachtern höchstens einer das Recht haben zu behaupten, daß er sich gegenüber dem Äther in Ruhe befindet, während nach der Relativitätstheorie stets jedem von beiden die gleichen Rechte zustehen.

Was Maxwell nur prophetisch voraussagen konnte, das hat ein Menschenalter später Heinrich Hertz in die Tat umgesetzt, indem er die von Maxwell berechneten elektromagnetischen Wellen wirklich herstellen lehrte, und damit hat er der elektromagnetischen Theorie des Lichts, nach welcher sich die elektrischen Wellen von den thermischen und optischen Wellen nur durch ihre etwa millionenmal größere Wellenlänge unterscheiden, zum endgültigen Siege verholfen. Wurde so das optische Spektrum nach der Seite der langsamen Schwingungen in früher ungeahnter Weise erweitert, so stellte sich diesem Ausbau der Theorie bald ein entsprechender nach der entgegengesetzten Richtung ebenbürtig zur Seite durch die Entdeckung der Röntgenstrahlen und der noch erheblich schneller schwingenden sogenannten Gammastrahlen radioaktiver Substanzen. Auch diese Strah-

Digitized by Google

len haben ganz den Charakter der Lichtwellen, es sind ebenfalls elektromagnetische Schwingungen, nur von ungeheuer viel kürzerer Wellenlänge; daß sie auch den nämlichen Gesetzen gehorchen, wurde durch die jüngste Lauesche Entdeckung der Interferenzerscheinungen bei Röntgenstrahlen noch besonders bekräftigt. Es ist bemerkenswert, wie leicht und sozusagen geräuschlos sich in der physikalischen Literatur der Übergang von der mechanischen zu der elektromagnetischen Betrachtungsweise vollzog — ein gutes Beispiel dafür, daß der Kern einer physikalischen Theorie nicht in den Anschauungen liegt, von denen sie ausgeht, sondern in den Gesetzen, zu denen sie führt. Die Grundgleichungen der Optik blieben bestehen; sie waren ja auch in Übereinstimmung mit der Erfahrung; aber sie wurden nun nicht mehr mechanisch gedeutet, so wie sie abgeleitet worden waren, sondern elektromagnetisch, und dadurch erweiterte sich ihr Anwendungsbereich ins Ungeheure.

Es ist nicht das erstemal, daß ein wichtiges, weitgestecktes Ziel erreicht worden ist auf einem Wege, der sich hinterher als unzuverlässig erwiesen hat. Man könnte versucht sein, daraus den Schluß zu ziehen, daß die Theorie besser täte, von der Ausarbeitung spezieller, über die unmittelbare Erfahrung hinausgehender Hypothesen überhaupt abzusehen und sich auf das rein Tatsächliche, d. h. auf die Ergebnisse der Messungen, zu beschränken. Indessen würde sie dadurch gerade das wichtigste Hilfsmittel aus der Hand geben, das sie zum Vorwärtskommen unbedingt nötig hat: die Aufstellung und folgerichtige Entwicklung von Gedanken, die weiterführen. Hierzu bedarf es nicht nur des Verstandes, sondern auch der Phantasie. In der Tat: Mag auch die mechanische Lichttheorie heute ihren Dienst getan haben, ohne sie wäre die Optik sicherlich nicht so schnell zur heutigen Blüte gelangt.

Digitized by Google

Auch die Huygenssche Undulationstheorie hat nach der elektromagnetischen Anschauung ihren wesentlichen Inhalt unverändert bewahrt, welcher besagt, daß eine jede Störung sich vom Erregungszentrum aus nach allen Richtungen in konzentrischen Kugelwellen ausbreitet. Nur ist das, was sich ausbreitet, nicht mehr mechanische, sondern elektromagnetische Energie, da an die Stelle der periodischen Ätherschwingungen die hin und her schwankende elektrische und magnetische Feldstärke tritt.

Von dem so gewonnenen höheren Standpunkt aus gewährt uns die Lehre vom Licht, oder, wie man jetzt häufig deutlicher sagt, die Lehre von der strahlenden Energie das Bild eines ebenso festgefügten wie einheitlichen und abgeschlossenen Riesenbaues, in welchem alle äußerlich so gänzlich verschiedenartigen elektromagnetischen Schwingungen wohl geordnet nebeneinander Platz finden und alle von den nämlichen Gesetzen der Fortpflanzung, der Huygensschen Wellentheorie gemäß, regiert werden, auf der einen Seite die kilometerlangen Hertzschen Wellen, auf der anderen die harten Gammastrahlen, von denen Milliarden Wellen auf ein einziges Zentimeter gehen. Das menschliche Auge erscheint dabei ganz ausgeschaltet, es tritt nur als ein zufälliges, allerdings sehr empfindliches, aber doch recht beschränktes Reagenzmittel auf; denn es empfindet nur Strahlen innerhalb eines kleinen Spektralbezirks von kaum Oktavenbreite. Für das übrige Spektrum treten an die Stelle des Auges andere Empfangs- und Meßapparate, die den verschiedenen Wellenlängen angepaßt sind, wie der Wellendetektor, das Thermoelement, das Bolometer, das Radiometer, die photographische Platte, die Ionisierungszelle. So hat sich in der Optik die Trennung des physikalischen Grundbegriffs von der spezifischen Sinnesempfindung in ganz derselben Weise vollzogen wie in der Mechanik, wo der Begriff der Kraft schon

Digitized by Google

längst seinen ursprünglichen Zusammenhang mit der Muskelempfindung verloren hat.

Meine Herren! Würde ich meinen Vortrag vor etwa 20 Jahren gehalten haben, so hätte ich ihn an dieser Stelle beenden können, denn grundsätzlich Neues wäre nicht mehr vorzubringen gewesen, und von dem geschilderten imposanten Bilde hätte sich eine ganz gute Schlußwirkung, zum höheren Ruhme der modernen Physik, erwarten lassen. Aber wahrscheinlich würde ich den Vortrag überhaupt nicht gehalten haben, aus Besorgnis, Ihnen darin zu wenig Neues bieten zu können. Das ist heute nun alles ganz anders geworden; denn seit jener Zeit hat sich das Bild nicht unwesentlich geändert. Das stolze Gebäude, das ich Ihnen soeben vorführte, hat neuerdings gerade in seinen Grundvesten gewisse ganz bedenkliche Lücken offenbart, und nicht wenige Physiker halten schon jetzt eine Neufundamentierung für geboten. Zwar die elektromagnetische Anschauung wird wohl für immer unangetastet bleiben, aber die Huygenssche Wellentheorie zeigt sich, wenigstens in einem wesentlichen Bestandteil, ernstlich bedroht, und die Ursache davon ist die Entdeckung gewisser neuer Tatsachen. Statt von dem vielseitigen hier vorliegenden Material möglichst viel zusammenzutragen, möchte ich zunächst nur auf eine einzige dieser Tatsachen etwas näher eingehen.

Läßt man ultraviolettes Licht auf ein Metallstück fallen, das sich in einem evakuierten Raum befindet, so werden aus dem Metall eine gewisse Menge Elektronen mit mehr oder minder großer Geschwindigkeit herausgeschleudert, und da die Größe dieser Geschwindigkeit im wesentlichen nicht vom Zustand des Metalls, insbesondere auch nicht von seiner Temperatur abhängt, so liegt der Schluß nahe, daß die Energie der herausfliegenden Elektronen nicht dem Metall, sondern den Lichtstrahlen entstammt, welche das Metall treffen.

Digitized by Google

Dies wäre an sich nicht verwunderlich; man hätte eben anzunehmen, daß die elektromagnetische Energie der Lichtwellen sich in die kinetische Energie der Elektronenbewegung verwandelt. Was aber der Huygensschen Wellentheorie eine scheinbar unüberwindliche Schwierigkeit bereitet, ist die zuerst von Philipp Lenard festgestellte Tatsache, daß die Elektronengeschwindigkeit nicht etwa von der Intensität der Strahlung, sondern nur von der Wellenlänge derselben, also von der Farbe des verwendeten Lichtes abhängt, derart, daß sie um so bedeutender ist, je kürzere Wellen benutzt werden. Rückt man also das Metall in immer größere Entfernung von der Lichtquelle, als welche z. B. ein elektrischer Entladungsfunke dienen kann, so fliegen trotz der schwächeren Beleuchtung die Elektronen doch immer mit der nämlichen Geschwindigkeit heraus; der einzige Unterschied ist der, daß mit der Abnahme der Lichtstärke die Zahl der in der Sekunde fortgeschleuderten Elektronen immer geringer wird.

Die Schwierigkeit liegt nun in der Beantwortung der Frage: woher nimmt ein herausfliegendes Elektron seine Bewegungsenergie, wenn schließlich die Entfernung von der Lichtquelle so groß wird, daß die Lichtintensität fast ganz verschwindet, während doch die Elektronen keine Spur einer Verminderung ihrer Geschwindigkeit zeigen? Es müßte sich hier offenbar handeln um eine Art Anhäufung der Lichtenergie auf die Stellen, wo die Elektronen abgeschleudert werden — eine Anhäufung, die der allseitigen gleichmäßigen Ausbreitung der elektromagnetischen Energie nach der Huygensschen Wellentheorie gänzlich fremd ist. Selbst wenn man annimmt, daß die Lichtquelle ihre Strahlung nicht gleichmäßig, sondern stoßweise, etwa nach Art eines Blinkfeuers, von sich gibt, so würde doch die Energie eines solchen Lichtblitzes bei der nach allen Richtungen gleichmäßigen

Digitized by Google

wellenförmigen Ausbreitung der Strahlung sich schließlich auf eine so große Kugelfläche verteilen, daß das bestrahlte Metall nur verschwindend wenig davon empfängt, und es ist leicht zu berechnen, daß unter wohl realisierbaren Bedingungen eine minuten-, ja stundenlange Bestrahlung notwendig wäre, um einem einzigen Elektron seine durch die Farbe des Lichtes bedingte Geschwindigkeit zu verleihen, während tatsächlich bezüglich der für das Eintreten des Effekts erforderlichen Strahlungsdauer bisher noch keine einschränkende Bedingung festgestellt werden konnte; die Wirkung erfolgt vielmehr jedenfalls äußerst schnell. Wie bei den ultravioletten Strahlen, so wird auch bei den Röntgenstrahlen und bei den Gammastrahlen ganz derselbe Effekt beobachtet, wobei natürlich die Geschwindigkeit der abgelösten Elektronen, wegen der viel kürzeren Wellenlänge dieser Strahlen, noch eine viel höhere ist.

Die einzig mögliche Erklärung für diese eigentümliche Tatsache scheint zu sein, daß die von der Lichtquelle ausgesandte Energie nicht nur zeitlich, sondern auch räumlich dauernd auf gewisse Häufungsstellen konzentriert bleibt, oder mit anderen Worten: daß die Lichtenergie sich nicht vollkommen gleichmäßig nach allen Richtungen ausbreitet, in endlos fortschreitender Verdünnung, sondern daß sie stets in gewissen bestimmten, nur von der Farbe abhängigen Quanten konzentriert bleibt, die mit Lichtgeschwindigkeit nach allen Richtungen auseinanderfliegen. Ein jedes derartige Lichtquantum, welches das Metall trifft, kann dann einem Elektron dortselbst seine Energie mitteilen, und diese bleibt dann natürlich immer dieselbe, mag die Entfernung von der Lichtquelle auch noch so groß sein.

Wir sehen hier die Newtonsche Emanationstheorie in einer anderen, energetisch modifizierten Form wieder auferstehen. Aber was der Newtonschen Emanationslehre seiner-

Digitized by Google

zeit die weitere Entwicklung versperrte, die Erscheinung der Interferenz des Lichtes, türmt sich auch der Lichtquantentheorie gegenüber als eine ungeheure Schwierigkeit auf; denn es ist zur Zeit schwer abzusehen, wie zwei gleich beschaffene, selbständig durch den Raum fliegende Lichtquanten, welche auf gemeinschaftlichem Wege zusammentreffen, sich gegenseitig sollen neutralisieren können, ohne daß das Energieprinzip verletzt wird.

Aus dieser Sachlage erwächst der Strahlungstheorie die dringende Aufgabe, jeden Versuch zu machen, um aus diesem nach beiden Seiten gefährlichen Dilemma auf irgendeine Weise herauszukommen. Da liegt es natürlich nahe, es auch mit der Annahme zu versuchen, daß die Energie der von dem Metall abgeschleuderten Elektronen doch nicht der Strahlung, sondern dem Metall entstammt, daß also die Strahlung nur auslösend wirkt, wie etwa ein winziger Funke in einem Pulverfaß beliebig große Mengen von Energie entfesseln kann. Nur müßte man dann die weitere Voraussetzung machen, daß der Betrag der ausgelösten Energie ausschließlich abhängig ist von der Art, in welcher die Auslösung erfolgt. Es fällt nicht schwer, in anderen Gebieten der Physik einigermaßen analoge Erscheinungen aufzuzeigen. Ich möchte hier beispielsweise an ein von Max Born gelegentlich gebrauchtes Bild etwas näher anknüpfen. Stellen Sie sich einen hohen Apfelbaum vor, in allen seinen Zweigen reich behangen mit reifen Früchten, die alle gleich groß, aber verschieden lang gestielt und so angeordnet sind, daß die kurzstieligen höher hängen als die langstieligen. Wenn nun ein äußerst schwacher, aber gleichmäßiger Wind durch die Zweige weht, werden die Äpfel alle ein wenig hin und her pendeln, die höher hängenden schneller, die tiefer hängenden langsamer, ohne daß einer von ihnen herabfällt. Wenn man jedoch den Baum ebenfalls äußerst schwach, aber in einem

Digitized by Google

bestimmten regelmäßigen Rhythmus schüttelt, so werden die Schwingungen derjenigen Äpfel durch Resonanz verstärkt, deren Periode mit dem Tempo des Schüttelns gerade übereinstimmt, und von ihnen wird eine Anzahl herabfallen, um so mehr, je länger und je kräftiger geschüttelt wird. Diese Äpfel werden mit einer ganz bestimmten, nur durch ihre ursprüngliche Höhe, also auch nur durch die Länge ihres Stieles bedingten Geschwindigkeit zu Boden fallen, alle übrigen bleiben hängen.

Es versteht sich, daß dieses Gleichnis, wie jedes andere, in mancher Beziehung hinkt, schon deshalb, weil in dem von mir geschilderten Bilde als maßgebende Energiequelle nicht innere kinetische Energie, sondern die Gravitation auftritt. Aber der wesentliche Punkt findet sich darin doch verwirklicht, daß nämlich die Endgeschwindigkeit der abgelösten Partikel lediglich von der Periode der Störung abhängt, während die Stärke der Störung nur die Zahl dieser Partikel beeinflußt.

Darf man aber einem winzigen Metallteilchen eine so verwickelte Struktur und eine solche Fülle von Energie andichten wie einem Apfelbaum? Diese Frage ist weniger verfänglich, als sie vielleicht zunächst klingt. Denn wir wissen längst, daß die chemischen Atome durchaus nicht die einfachen unveränderlichen Bausteine sind, aus denen sich alle Materie zusammensetzt, daß vielmehr jedes einzelne Atom, besonders dasjenige eines Schwermetalls, als eine ganze Welt betrachtet werden muß, deren Inhalt sich um so reicher und bunter erweist, je tiefer man in sie eindringt. Und was die Energie betrifft, so enthält nach der Relativitätstheorie jedes Gramm einer Substanz in sich einen von der Temperatur ganz unabhängigen Energiebetrag von über 20 Billionen Kalorien, mehr als genug, um eine Unzahl Elektronen auszuschleudern.

Digitized by Google

Ob nun die zuletzt angedeutete Auffassung wirklich den rettenden Ausweg für die gefährdete Wellentheorie bedeutet, oder ob sie schließlich doch nur in eine Sackgasse hineinführt, wird sich nur dadurch entscheiden lassen, daß man den geschilderten Weg wirklich betritt und zusieht, wo er endigt. Hier hat zunächst die Arbeit des Theoretikers einzusetzen. Er muß sich vor allem in eine der beiden einander gegenüberstehenden Hypothesen vertiefen, und zwar ohne Rücksicht darauf, ob er derselben mehr oder weniger Vertrauen schenkt, und muß die in ihr steckenden Folgerungen herausarbeiten, um sie in eine Form zu bringen, die der Prüfung durch das Experiment zugänglich ist. Dazu gehört außer der physikalischen Schulung und dem nötigen mathematischen Rüstzeug auch ein zutreffendes Urteil über das Maß der Anforderungen, die man an die Genauigkeit der Messungen stellen darf; denn die zu erwartenden Effekte liegen zumeist hart an der Grenze der Beobachtungsfehler. Wann wir auf diesem Wege bei dem vorliegenden Problem zu ganz klaren Resultaten gelangen werden, läßt sich heute noch nicht mit Sicherheit voraussagen. —

Was ich hier über die Wirkungen des Lichts auszuführen suchte, das gilt in ganz ähnlicher Weise auch von den Ursachen des Lichts, also von den Vorgängen bei der Erzeugung der Lichtstrahlen. Auch hier stehen gewissen überraschend tiefen Einblicken, die man neuerdings in die Gesetzmäßigkeit des natürlichen Geschehens tun konnte, neue schwer entwirrbare Rätsel gegenüber. Sicher ist nur so viel, daß auch bei der Entstehung des Lichtes die nämlichen Quanten wieder eine charakteristische Rolle spielen.

Nach der kühnen Hypothese des dänischen Physikers Niels Bohr, deren Erfolge sich gerade in der letzten Zeit erstaunlich vervielfacht haben, finden in jedem Atom eines leuchtenden Gases Schwingungen von Elektronen statt, die

Digitized by Google

in größerer oder geringerer Anzahl und in verschiedenen Abständen um den schweren Atomkern herumkreisen, in ganz bestimmt gearteten Bahnen, doch genau nach den nämlichen Gesetzen wie die Planeten um die Sonne. Aber das Licht, welches aus diesen Schwingungen entspringt, wird keineswegs so ununterbrochen und gleichmäßig von dem Atom in den umgebenden Raum hinausgesandt, wie etwa die Schallwellen von den Zinken einer schwingenden Stimmgabel, sondern die Emission des Lichtes erfolgt immer nur abrupt, stoßweise; denn sie wird gar nicht bedingt durch die regelmäßigen Elektronenschwingungen selber, sondern sie tritt nur dann ein, wenn diese Elektronenschwingungen einmal plötzlich eine Veränderung erleiden, und zwar einen gewissen Zusammenbruch in sich selbst, also eine Art innerer Katastrophe, welche die Elektronen aus ihren ursprünglichen Bahnen in andere, stabilere, mit geringerer Energie ausgestattete Bahnen wirft; und der dabei verbleibende Überschuß von Energie ist es, welcher das Atom verläßt, um nun als ein Lichtquantum in den Raum hinauszueilen.

Das Seltsamste bei diesem Vorgang ist wohl, daß die Periode des emittierten Lichtes, also seine Farbe, nicht im geringsten zusammenhängt mit der Periode der Elektronenschwingungen, weder in ihren ursprünglichen noch in ihren späteren Bahnen; sie wird vielmehr ausschließlich bedingt durch den Betrag der emittierten Energie. Da nämlich das Lichtquantum um so größer ist, je schneller die Schwingungen erfolgen, so entspricht einem größeren Energiebetrag, als Lichtquantum genommen, eine kürzere Wellenlänge. Wenn also z. B. viel Energie emittiert wird, so entsteht etwa ultraviolette oder gar Röntgenstrahlung; wenn aber wenig emittiert wird, so entsteht rote oder ultrarote Strahlung. Wieso es aber kommt, daß die Schwingungen des solcherweise erzeugten Lichtes mit äußerster Regelmäßigkeit, streng mono-

Digitized by Google

chromatisch, erfolgen, bleibt einstweilen vollständig im Dunkeln.

Fürwahr: man könnte geneigt sein, alle diese Vorstellungen als das Spiel einer zwar blühenden, aber doch leeren Phantasie zu bewerten. Wenn man jedoch andererseits bedenkt, daß es mit Benutzung dieser Hypothesen gelingt, die geheimnisvolle, schon seit Jahrzehnten von zahlreichen Physikern in unablässiger angestrengter Arbeit durchforschte Struktur der Spektren der verschiedenen chemischen Elemente, insbesondere die verwickelten Gesetzmäßigkeiten in der Anordnung der Spektrallinien, über die bereits ein riesiges kostbares Beobachtungsmaterial angesammelt und gesichtet ist, mit einem Schlage aufzuhellen, nicht nur im großen und ganzen genommen, sondern, wie zuerst Arnold Sommerfeld nachgewiesen hat, zum Teil bis in die feinsten Einzelheiten hinein, mit einer Genauigkeit, welche mit der der schärfsten Messungen wetteifert, ja sie stellenweise noch übertrifft — dann wird man sich doch des Eindrucks nicht erwehren können, daß es wieder einmal wirklich gelungen ist, der Natur etwas auf die Sprünge zu kommen, im wörtlichen Sinne gesprochen, und daß man wohl oder übel sich entschließen muß, diesen Lichtquanten eine gewisse reale Existenz zuzuerkennen, wenigstens für den Augenblick ihres Entstehens. Was dann später aus ihnen wird, wenn sich das Licht weiter in die Umgebung verbreitet: ob die Energie eines Quantums räumlich dauernd beisammen bleibt, im Sinne der Newtonschen Emanationstheorie, oder ob sie sich, im Sinne der Huygensschen Wellentheorie, nach allen Richtungen ausbreitet und dadurch ins Endlose verdünnt, das ist eine andere Frage, deren grundsätzliche Bedeutung schon früher von mir betont wurde.

So klingt denn mein heutiger Bericht über unsere Kenntnisse von dem physikalischen Wesen des Lichts nicht in

Digitized by Google

eine stolze Verkündigung, sondern in ein bescheidenes Fragezeichen aus. In der Tat ist die Frage, ob die Lichtstrahlen selber gequantelt sind, oder ob die Quantenwirkung nur in der Materie stattfindet, wohl das erste und schwerste Dilemma, vor das die ganze Quantentheorie gestellt ist und dessen Beantwortung ihr erst die weitere Entwicklung weisen wird.

Ich habe Sie, meine Herren, mit meinen Ausführungen auf engem Pfade weit, vielleicht weiter als manchem ratsam erscheinen mag, an die äußerste Front der Forschung zu geleiten versucht, bis an eine der mancherlei Stellen, wo gegenwärtig Pioniere aller Nationen in unblutigem Wetteifer darum ringen, auf neuem, unbekanntem Gelände festen Fuß zu fassen. Auch unsere Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft ist in gewissem Sinne an diesen Arbeiten beteiligt, da sie ein besonderes Institut für physikalische Forschung besitzt, und der Name seines Direktors: Albert Einstein bürgt dafür, daß jede an die Direktion gelangende Anregung, welche einen Erfolg in Aussicht stellt, auf das sorgsamste geprüft und gegebenenfalls kräftig unterstützt werden wird. Es wäre gerade in der heutigen, an grausamen Enttäuschungen so reichen und auf hoffnungsvolle Ausblicke so sehnlich harrenden Zeit ein trostverheißendes Zeichen dafür, daß in unserem Vaterland an manchen Stellen die geistigen Kräfte doch noch von der alten Frische sind, wenn gerade die deutsche Forschung dazu beitragen könnte, auf diesem für die internationale Wissenschaft hochbedeutsamen Gebiete einen weiteren entscheidenden Schritt vorwärts zu tun.

Druck der Spamerschen Buchdruckerei in Leipzig.

Digitized by Google

Digitized by Google

UNIVERSITY OF CALIFORNIA LIBRARY
BERKELEY

Return to desk from which borrowed.
This book is DUE on the last date stamped below.

Sep 13'48 LS

9 Jun'56 RW

MAY 2 8 1956 LU

27 May'61 CK

RECD LD

MAY 20 1961

REC. CIR. JUN 29 '76

MAY 22 1977

REC. CIR. APR 2 4 '78

LD 21-100m-9,'47 (A5702s16) 476

Digitized by Google

U. C. BERKELEY LIBRARIES
C061365057

471441
QC361
P6
UNIVERSITY OF CALIFORNIA LIBRARY

Digitized by Google